

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE *CAMPO* EN FÍSICA

MARTÍN, JOSÉ¹ y SOLBES, JORDI²

¹ Centro de Profesores y Recursos. C/ Poeta Ramón de Garciasol s/n. 19004 Guadalajara

² IES José Rodrigo Botet. C/ Stos. Justo y Pastor, 70. 46949 Manises
jordi.solbes@uv.es

SUMMARY

The concept of *field* presents a special relevance in Physics. However, its teaching offers a series of difficulties and deficiencies that have been analysed by us in previous investigations. According to our analysis and research by other authors, we have elaborated a new proposal for the introduction of this concept in Secondary Education and High School. In this study, the guidelines of the forementioned proposal, which has been put into practice in the classroom and assessed later on, are presented. The results have been analysed through different instrumental means, and have been compared with the results obtained by students who follow the statutory programmes.

INTRODUCCIÓN

La importancia del concepto de *campo* (en particular *campo de fuerzas*) tanto desde un punto de vista científico como técnico es indiscutible. Para la física, su introducción supuso poner en duda y superar el marco teórico mecanicista, como dice García Doncel (1994), «sin esta idea básica de campo, la evolución posterior de la física relativista y cuántica resulta inconcebible. El impacto que el descubrimiento de las ondas electromagnéticas ha tenido sobre la física es muy profundo. Ellas le han impuesto una segunda revolución conceptual», mientras que, desde un punto de vista técnico, el nacimiento de la electrotecnia, la transmisión de señales y la revolución en las comunicaciones nos han llevado a la nueva era de la información.

Por ello se hace necesario incluir en los programas de física de secundaria y bachillerato el concepto de *campo*

a pesar de que ello siempre ha resultado difícil, tanto para profesores como para alumnos. Aparecen complicaciones que se deben a varias razones y entre las que destacamos:

a) la dificultad que encontramos para realizar una introducción cualitativa del campo, dado el nivel de abstracción de los conceptos implicados;

b) que no los podemos relacionar fácilmente con la experiencia cotidiana de los alumnos, como puede ocurrir con los conceptos de mecánica;

c) y sobre todo que durante el proceso de enseñanza se olvida, frecuentemente, que las interacciones entre partículas pueden describirse de diversas formas (fuerzas, campos, energías, etc.), y podemos desorientar a los

alumnos si no se clarifican suficientemente los conceptos, estableciendo sus relaciones, sus diferencias y ámbitos de aplicación. (Solbes y Martín, 1991; Martín y Solbes, 1999; Martín Quero, J., 1999).

En efecto, la mayor parte de las situaciones estudiadas en secundaria y bachillerato corresponden a casos estáticos, por lo que en el aula se mezclan la teoría newtoniana –que interpreta las interacciones entre cargas o masas mediante fuerzas a distancia e instantáneas– y la teoría de campos –que las interpreta como interacciones locales con el campo existente previamente en el punto donde se colocará dicha carga o masa. Todo ello se hace sin mostrar las limitaciones de la primera, especialmente en aquellos casos en que los campos dependen del tiempo, y sin las ventajas de la segunda, al permitir comprender estas situaciones, integrar dominios de la física que inicialmente estaban desconectados como la óptica y el electromagnetismo, etc.

¿Cómo introducimos, por tanto, el concepto de *campo*? Dos visiones parecen predominar:

- 1) Como un procedimiento heurístico para calcular la fuerza de interacción; es decir, un modelo útil, un proceso intelectual, matemático, que facilita los cálculos.
- 2) Como una realidad física cuya existencia es esencial para explicar muchas situaciones y procesos en los que están presentes.

La primera de estas visiones parece la predominante si se restringe el uso de campos a fenómenos estáticos. Entonces, las cuatro ecuaciones de Maxwell se escinden en dos grupos de dos ecuaciones, uno para la electrostática y otro para la magnetostática. Como señala Sharma (1987), «en estas situaciones, la energía almacenada en los campos es la misma que la energía potencial de las configuraciones de cargas o de corrientes, y el momento lineal y angular va asociado sólo a los campos que se propagan».

Sin embargo, el significado físico de los campos aparece mucho más claramente cuando hablamos de ondas electromagnéticas; entonces, «B y E parecen cobrar vida cuando se ve que pueden propagarse en el vacío» como se dice en la unidad 8 del Nuffield Advanced Physics. Además, vuelve a señalar Sharma (1987), «la velocidad finita de la propagación de las señales electromagnéticas, la acción retardada, necesita campos para llevar energía, momento lineal y angular». Poon (1986) añade, «en la inducción EM la transferencia de energía a través de distancias macroscópicas está muy claramente relacionada con la acción de campos variables en el tiempo». Por ello, ¿por qué establecer una dicotomía entre situaciones estáticas o no? Consideremos desde un principio que los campos son «reales», tan reales como una partícula material. Como señalan diversos autores (Feynman [1972] y Tipler [1992]) y resume muy bien Pomer (1994): «El campo que en principio se introduce como una magnitud accesoria para describir la interacción llega a considerarse una entidad tan real como las fuentes que lo crean, realidad que resulta más evidente cuando las fuentes dependen del tiempo, ya que, enton-

ces, el campo transporta energía y momentos, lineal y angular, como las partículas materiales.»

CÓMO SE ENSEÑA Y CÓMO SE APRENDE EL CONCEPTO DE CAMPO

Las dificultades señaladas anteriormente han sido contrastadas de un modo experimental (Solbes y Martín, 1991; Martín y Solbes, 1999; Martín Quero, 1999) mediante la utilización de varios cuestionarios (aplicados a textos, profesores y alumnos) y la realización de entrevistas a alumnos. Con ellos pretendíamos responder a las siguientes cuestiones:

– ¿Cómo se introduce, habitualmente, el concepto de *campo* en el aula, tanto desde un punto de vista científico como didáctico?

– ¿Cómo se aprende, por parte del alumno, dicho concepto?

El primero de los cuestionarios utilizados está dirigido, fundamentalmente, a analizar la forma en que los libros de texto empleados en el aula de física y química introducen el concepto de *campo*. Se aplicó a 39 textos de los diversos niveles que conforman el sistema educativo español, desde el último ciclo de EGB hasta COU y algunos del actual bachillerato.

Por otro lado, un segundo cuestionario fue usado con un total de 280 alumnos, divididos en dos muestras, una primera de 135 alumnos (Nivel I) que habían cursado estudios hasta 2º de BUP (hasta 16 años de edad), y otra segunda de 145 alumnos (Nivel II) de 3º de BUP, COU y 2º curso de escuela universitaria de formación del profesorado de EGB (de 17 a 20 años de edad).

Respecto a los profesores, se aplicaron los cuestionarios a diversas muestras, tanto de profesores en activo como a licenciados que seguían un curso de formación inicial (CAP).

A partir de los resultados obtenidos mediante los instrumentos señalados podemos afirmar lo siguiente:

1) La imagen que el alumno adquiere del campo está lejos de la concepción científica. Lo considera como una región del espacio o volumen que delimita la influencia de una masa, carga o imán. Para él, el campo está vacío de significado, al contrario que los conceptos de *masa*, *carga*, *fuerza*... y, por tanto, es innecesario, redundante y complicado. El alumno sigue pensando en términos de fuerza y no modifica sus ideas previas sobre la interacción entre partículas, lo que hará que mantenga los errores que pueda tener inicialmente.

Así, la mayoría de los textos definen el campo utilizando frases como:

«Campo de fuerzas es la región del espacio donde se pueden detectar fuerzas creadas por una carga, masa o imán.»

O usan expresiones análogas, que inducen al alumno a identificar el campo con una zona del espacio, un volumen de influencia, y no como el agente de la interacción. No es de extrañar, por tanto, que el alumno, al contestar los ítems de su cuestionario o al ser entrevistado, responda que el campo es:

– «[...] la región del espacio donde un cuerpo se ve sometido a la fuerza de otro.»

– «[...] un espacio en el cual dos partículas son atraídas o repelidas por su carga.»

En el fondo, tanto en la definición dada como en las respuestas obtenidas, subyace la idea de que la fuerza se debe a las fuentes (cargas, masas o imanes) y no al campo. Estamos ante una visión newtoniana de la interacción, en la que ésta se efectúa entre las partículas y no entre el campo y la partícula.

Entre las posibles causas que explican este resultado, encontramos que en el aula se enfatiza principalmente el carácter operativo del concepto de *campo*. Así el vector «intensidad de campo» (definido como «fuerza por unidad de carga o masa») se utiliza preferentemente para calcular la fuerza, y sólo un 30% del profesorado en activo confiesa realizar discusiones cualitativas que clarifiquen el concepto de *campo* y doten a éste de significado (14 % en el caso de alumnos del CAP).

Con ello el alumno no llega a distinguir campo y fuerza, e incluso, tanto ellos como algunos profesores llegan a confundir *E* y *F* (Solbes y Martín, 1991; Martín y Solbes, 1999; Martín Quero, 1999; Domínguez y Moreira, 1988; Furió, y Guisasaola, 1993, 1998; Bar, Zinn y Rubin, 1997; Greca y Moreira, 1997).

También debemos destacar que un porcentaje considerable (15% en ambos niveles) de alumnos confunde el campo con sus efectos y considera a éste como una zona en la que existe gravedad, o por la cual circula una corriente eléctrica, o que está magnetizada (Viennot y Raison, 1992, 1999; Greca, y Moreira, 1997; Sneider, y Ohadi, 1998).

2) El alumno no llega a conocer las diferencias que sobre la interacción entre partículas introduce la teoría de campos mediante acciones contiguas frente a la interpretación newtoniana a través de acciones a distancia. Tampoco conoce las ventajas que la teoría de campos introduce: explicación de nuevos fenómenos como la inducción o las ondas electromagnéticas; integración de dominios separados como la óptica y el electromagnetismo; apertura de nuevas líneas de investigación; influencia en el avance posterior de la física... Y por otra parte, no llega, a relacionar la teoría con sus aplicaciones tecnológicas, ni las repercusiones que ha tenido para la ciencia y la sociedad.

En efecto, los libros de texto no llegan a diferenciar claramente entre ambas teorías. Sólo un 11% de los textos que hemos analizado muestra las diferencias e implicaciones que supone interpretar la interacción me-

diantes campos o mediante fuerzas a distancia, ya que el tratamiento didáctico realizado no tiene como objetivo diferenciar entre ambas teorías, ni mostrar sus limitaciones, sus ventajas y sus ámbitos de aplicación (los textos de COU suelen realizar una comparación de los campos eléctrico y gravitatorio que muestra semejanzas y diferencias entre ellos, pero desde un punto de vista más bien formal). El campo es un medio de calcular la fuerza y, por tanto, no llega a adquirir un verdadero significado físico. En consecuencia, resulta lógico encontrar, tanto entre profesores en activo como entre alumnos del CAP, que sólo un 5% del profesorado sea capaz de responder a la pregunta: *¿Crees que explicar las interacciones entre partículas mediante campos es mejor que mediante la idea de fuerzas a distancia? ¿Qué ventajas introduce?* Y escasamente un 18% es capaz de indicar alguna de las limitaciones del concepto de *fuerza* para describir las interacciones. En concordancia, sólo un 9% del alumnado reconoce que la noción de *campo* evita la idea de acción a distancia entre partículas convirtiéndola en una acción local entre la partícula y el campo existente en dicho punto y, en consecuencia, es capaz de reconocer que la teoría de campos presenta ventajas frente a la newtoniana de acciones a distancia.

Por otro lado, muy pocos alumnos (11%) conocen las implicaciones técnicas y sociales de la teoría electromagnética, el resto son incapaces de señalar tres o más aplicaciones tecnológicas de la teoría. Desconocen, incluso, que las ondas de radio y televisión poseen una naturaleza electromagnética.

Por último,

3) *El alumno no conoce la interpretación de los aspectos energéticos asociados a la interacción.*

De nuevo encontramos que los libros de texto empleados por el profesorado no presentan el campo como una realidad física dotada de energía y momento. Sólo algunos textos que llegan a introducir el teorema de Gauss asocian la energía almacenada en un condensador al campo existente entre sus placas, aunque posteriormente no realizan una discusión sobre las implicaciones de este resultado ni llegan a generalizarlo a otras situaciones. Tampoco el profesorado llega a realizar esta discusión, a pesar de que la estimamos esencial para dotar al campo de energía y momento, de forma que éste llegue a adquirir un significado físico equiparable al que tienen otros conceptos, como, por ejemplo, el de *partícula* o el de *fuerza*.

En efecto, la energía potencial y los balances energéticos en situaciones que implican el movimiento de partículas en presencia de campos, se siguen interpretando y realizando sin tener en cuenta el papel que juega el campo. En consecuencia la energía, para la mayoría de los alumnos (más de un 90%), sigue estando asociada a la materia, que actúa como soporte de ésta. En el mejor de los casos, puede asociarse al sistema de partículas, pero el campo desarrolla un papel totalmente pasivo (Poon, C.H., 1987; Sharma, N.L., 1987; Strube, P., 1988).

Estos resultados han sido atribuidos por nosotros a varias razones, pero fundamentalmente a la metodología utilizada en el proceso de enseñanza que, como ha puesto de manifiesto la investigación didáctica, olvida la estructura conceptual del alumno, sus ideas previas, sus concepciones, a partir de las cuales se abordan las nuevas preguntas, se interpretan las situaciones, se resuelven problemas y se elaboran explicaciones o se hacen previsiones (Gil et al., 1991, 1999). El profesor se conforma con definiciones operacionales y tanto él como los libros de texto ordenan los contenidos sin tener en cuenta la forma en que se generan las teorías científicas, en concreto la teoría de campos (Berkson, 1985; Cantor, Goodin y James, 1994), y olvidan los métodos propios del quehacer científico, el papel de las hipótesis, las ideas filosóficas de los científicos, etc., (Gil, 1983; Gil et al., 1991, 1999; Solbes y Traver, 1996; Bagno y Eylon, 1997).

Será lógico pensar, entonces, que modificando la forma de presentar la teoría de campos, de forma que se tengan en cuenta tanto en los contenidos como en la metodología, las aportaciones realizadas por la epistemología y la didáctica de la ciencia, podamos obtener mejores resultados en cuanto a la superación de las dificultades señaladas. Si organizamos los contenidos de modo que, además de presentar los conceptos en su forma final, se pongan también de manifiesto los problemas que propiciaron su aparición, su evolución histórica y la potencialidad del nuevo marco conceptual establecido, se facilitará el aprendizaje significativo.

UNA PROPUESTA ALTERNATIVA PARA LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE CAMPO: RASGOS PRINCIPALES

Con la orientación señalada anteriormente, se diseñó una propuesta de enseñanza-aprendizaje dentro del marco establecido para la enseñanza de la física en secundaria y bachillerato, lo que condicionó, sobre todo en el caso de los alumnos de cursos superiores, el tiempo de instrucción y los objetivos finales a conseguir, dada la existencia de la prueba de acceso a la universidad.

Por otra parte, esta propuesta se enmarca en un modelo de enseñanza-aprendizaje basado en ideas constructivistas, que prima aspectos propios de la actividad científica (formulación y resolución de problemas abiertos, emisión y contrastación de hipótesis...), que concibe el aprendizaje como una construcción de conocimientos por parte del alumno con las características de una investigación dirigida por un experto, el profesor, configurando lo que se ha denominado una metodología de aprendizaje por investigación dirigida y que se concreta en la propuesta de programas de actividades (Gil et al., 1991, 1999).

Se han tenido en cuenta, además, los resultados obtenidos en la investigación didáctica sobre aspectos como la resolución de problemas, los trabajos prácticos, la evaluación de conocimientos, las interacciones ciencia-

técnica-sociedad... y particularmente, los trabajos de otros autores, como Watts (1982), que consiguió enmarcar las ideas de los estudiantes sobre la interacción gravitatoria en ocho esquemas, en los que éstos ponen de manifiesto, por ejemplo, la necesidad de que exista un medio material que propague la interacción; o bien los trabajos de Domínguez y Moreira (1988), Nardi y Carvalho (1990), Furió y Guisasola (1993), Galili (1993), Nardi (1994), Meneses y Caballero (1995), Bar, Zinn y Rubin (1997), Sneider y Ohadi (1998); en relación con la problemática de las ideas previas del alumno sobre la interacción electromagnética y gravitatoria. También se han analizado las propuestas de secuencias de enseñanza efectuadas por Cudmani y Fontdevilla (1989), Nardi y Carvalho, (1990), Meneses y Caballero, (1995), y se ha considerado especialmente la crítica que Galili (1995) realiza acerca del elevado peso de la mecánica newtoniana en los programas de física de los diversos niveles educativos, considerando que muchas de las respuestas erróneas de los alumnos a cuestiones de electromagnetismo se deben al intento de aplicar los conocimientos adquiridos en mecánica a este tipo de fenómenos.

Se han diseñado dos programas de actividades, uno para un nivel elemental (4º de ESO) y otro para un nivel superior (bachillerato), que por el carácter parcialmente cíclico del currículo contienen algunas actividades idénticas, aunque evidentemente presentan diferencias de tratamiento. El conjunto de actividades, que el alumno debe desarrollar secuencialmente, va acompañado de comentarios en los que se explica al profesor el objetivo y las dificultades que cada una de ellas presenta, las contestaciones más habituales de los alumnos y la información que se puede añadir en las recapitulaciones que realiza el profesor (Solbes y Tarín, 1996; Martín Quero, 1999).

Las líneas básicas que orientan estos programas de actividades son:

- a) Introducción temprana del concepto de *campo*, realización de discusiones cualitativas en contextos físicos simples e introducción de las relaciones ciencia-técnica-sociedad.
- b) Presentación del campo como agente de la interacción, dotado de realidad física, de energía y de momento, con existencia propia independiente de la fuerza, de forma que el alumno comprenda su necesidad, lo que nos lleva a no establecer dicotomía entre situaciones estáticas y cronodependientes y a prevenir la asociación entre energía y partícula mediante la clarificación de los aspectos energéticos en aquellas situaciones en las que interviene el campo.

En ambos programas hemos optado, de acuerdo con Galili (1995), por aproximarnos al campo a través del estudio de la interacción gravitatoria, ya que sobre este tema el alumno posee una mayor experiencia personal. La atracción gravitatoria es algo con lo que el alumno convive, conoce sus efectos y presenta ya ideas previas para interpretar la caída de los cuerpos, el movimiento de los satélites y los planetas... Se encuentra inmerso en una sociedad en la que las noticias de tipo «espacial»

aparecen frecuentemente en la prensa y la televisión, creando una problemática de interés para él. La interacción entre cargas eléctricas queda más alejada de su experiencia cotidiana y por ello creemos que, una vez introducido el campo en temas de gravitación, será más fácil generalizar a otras situaciones análogas.

En el primer nivel o nivel elemental, el programa de actividades, titulado «Astronomía y gravitación», persigue, como objetivo fundamental, que el alumno llegue a utilizar el concepto de *campo* de una forma cualitativa para explicar las interacciones, de manera que asuma el hecho de que una partícula no puede actuar a distancia, es decir, allí donde no está, y que la interacción se realiza entre el campo y la partícula que penetra en él y no entre ambas partículas. También se introducen algunas aplicaciones tecnológicas (satélites) y aspectos sociales de interés (el impacto del modelo heliocéntrico). Su hilo conductor es el siguiente (Martín, 1999):

1. Antecedentes: Primeras ideas sobre el Universo
2. El sistema geocéntrico
3. El sistema heliocéntrico
4. Ley de la gravitación universal.
5. El campo gravitatorio
6. Consecuencias de la ley de gravitación. Imagen actual del Universo
7. El lanzamiento de satélites artificiales.

En el segundo nivel o nivel superior, se profundiza en el tratamiento cuantitativo de la interacción gravitatoria y se estudian ahora las interacciones eléctrica y magnética con la finalidad de llegar a mostrar como, a través del concepto de *campo*, podemos explicar fenómenos en los que el campo varía con el tiempo, como la inducción y las ondas electromagnéticas, y se introducen los aspectos energéticos ligados a la interacción. Para este programa hemos seguido un enfoque más histórico, de modo que el alumno conozca los problemas que planteaba la interpretación mecanicista y comprenda la necesidad de introducir el campo, no sólo para evitar estos problemas, sino también para abrir nuevas vías de investigación que permitan el desarrollo posterior de la física y la tecnología. El hilo conductor del tema «Interacción gravitatoria» es (Solbes y Tarín, 1996; Martín, 1999):

1. Los orígenes de la teoría de la gravitación
2. La conservación del momento angular
3. Ley de Newton de la gravitación universal
4. Campo gravitatorio
5. Estudio energético de la interacción gravitatoria
6. Movimiento de planetas y satélites
7. La síntesis newtoniana y su extensión al Universo.

Y el del tema «Interacción electromagnética»:

1. Electricidad
 - 1.1. Campo eléctrico
 - 1.2. Fuerzas entre campos eléctricos y cargas
 - 1.3. Estudio energético de la interacción eléctrica
2. Magnetismo
 - 2.1. Relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos
 - 2.2. Campo magnético

- 2.3. Fuerzas entre campos magnéticos y cargas móviles
- 2.4. Explicación cualitativa del magnetismo natural
3. Electromagnetismo
 - 3.1. Inducción electromagnética
 - 3.2. Síntesis electromagnética de Maxwell.

Ciertas actividades utilizadas en el programa están dirigidas a resaltar algunas de las dificultades de la teoría newtoniana para explicar la interacción entre cuerpos distantes:

Actividad. La idea newtoniana de acción a distancia entre los cuerpos presenta una serie de dificultades que no pasaron desapercibidas al propio Newton. Indica alguno de dichos problemas.

Actividad. La experiencia de Oersted pone de manifiesto que las fuerzas entre una corriente y una aguja magnética no van dirigidas según la línea de unión entre ambos cuerpos. ¿Implica esto alguna ruptura con la imagen newtoniana de las acciones a distancia?

Comentario: La primera actividad se utiliza en los niveles elemental y superior. Los alumnos deben darse cuenta de los dos problemas básicos del modelo newtoniano de fuerzas: las interacciones son a distancia e instantáneas. Del primero de ellos ya era consciente el propio Newton, como pueden leer los alumnos en el texto que el propio Newton llegó a escribir (Holton, 1976): «Es inconcebible que la materia bruta, inanimada, sin la mediación de algo más que no sea material influya y afecte a otra materia sin contacto mutuo [...] Una gravedad [...] tal que cualquier cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de algo más, a través de lo cual pueda actuar la acción y la fuerza, es para mí un absurdo tan grande que no creo que exista un hombre que con facultad de pensamiento sobre materias filosóficas pueda creer en ello. La gravedad debe estar causada por un agente que actúa constantemente según ciertas leyes.» Esto aclara la búsqueda de teorías como los torbellinos de Descartes o que Newton defendiese en su «óptica» la idea de un agente material (éter) que explicase la aparente acción a distancia. El segundo problema está implícito en el primero, pero en aquella época no se planteó porque no se conocía la existencia de una velocidad límite.

La segunda sólo se plantea en el nivel superior. El hecho de que nos encontremos ante fuerzas que no son centrales debe conducirnos a cuestionar el modelo newtoniano de acciones centrales que se deriva de la ley de gravitación universal y de la ley de Coulomb. Posteriormente esto permite comprender la imposibilidad de introducir la energía potencial magnética. Por otra parte, la visualización de las líneas de campo magnético (mediante limaduras, pequeños imanes, etc.) facilita poner en cuestión la acción a distancia.

Otras actividades se dirigen a la búsqueda de posibles alternativas:

Actividad. ¿Cómo tendrá lugar la interacción entre dos masas distantes entre sí?

Actividad. ¿Cómo interpretarías el hecho de que la carga q «note» (indica en qué sentido se utiliza ese verbo) la existencia de otra carga Q situada a una determinada distancia? Es decir, ¿cómo tendrá lugar la interacción entre cuerpos cargados distantes entre sí?

Comentario: Estas actividades se pueden utilizar en ambos niveles. Plantean la necesidad de explicar la interacción de otra forma que no sea mediante fuerzas a distancia, lo que conduce, por tanto, a la introducción del campo gravitatorio como una realidad física, como el agente causante de la interacción. Algunos autores consideran que el campo es una forma de existencia de la materia-energía a través de la cual se propagan las interacciones. En otras palabras, clásicamente la materia se presenta en dos formas: partículas y campos.

Esta cuestión la podemos volver a plantear en el caso de interacciones entre cargas eléctricas y la necesidad de construir un nuevo marco conceptual que evite los problemas de la interpretación de la interacción mediante «fuerzas a distancia e instantáneas». En cambio para introducir los aspectos energéticos en situaciones en las que hay campos presentes utilizaremos actividades como las que siguen:

Actividad. Cuando un cuerpo cae libremente se suele decir que «la energía potencial que el cuerpo posee en el punto más alto se va transformando en energía cinética». Justifica la corrección de esta expresión.

Actividad. La energía potencial E_p que podemos introducir siempre que tengamos un campo, ¿dónde puede considerarse localizada?

Comentario: La primera actividad se utiliza en el nivel elemental y la segunda en el superior. Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, su trabajo produce un incremento de la energía cinética de éste. Al desaparecer la fuerza, el cuerpo continúa con esa energía cinética, puede suponerse, por tanto, que la energía cinética «permanece» en el cuerpo. Sin embargo, en un campo y con relación a la

energía potencial no es tan claro realizar esta afirmación, por ello una pregunta interesante es: ¿Dónde está ubicada la energía electrostática? Dice Feynman (1972) que «desde el punto de vista electromagnético no es absolutamente necesario responder a esta cuestión pero, dado que la masa y la energía están relacionadas por la teoría de la gravitación que surge de la relatividad, toda energía es una fuente de atracción gravitatoria, por lo que, si no podemos ubicar esta energía, la teoría de la gravitación sería incompleta». Se debe plantear, entonces, la cuestión fundamental de dónde localizar la energía. En este punto, la mayoría de los libros de texto emplean un lenguaje ambiguo, de forma que el alumno suele asociarla a la carga que se mueve en el interior de campo, en parte a causa del lenguaje utilizado. En cursos anteriores, donde no se introduce el concepto de *campo* y, sin embargo, se aplica el principio de conservación de la energía, la E_p suele aparecer como propia de la partícula que se mueve (caso de la primera actividad). El profesor deberá plantear que dicha asociación no es tan clara, ya que la energía potencial depende de las dos masas o cargas que interaccionan y no sólo de una de ellas. Más adelante al estudiar las ondas EM, se podrá hablar de la energía asociada al propio campo.

Por otra parte, estamos ante un tema que nos permite poner claramente de manifiesto las interacciones CTS, relacionadas con problemas medioambientales o con soluciones tecnológicas cotidianas. Actividades como:

Actividad. Otras aplicaciones de la electrostática que podemos poner como ejemplo son la fotocopiadoras y el proceso de xerografía. Busca en la bibliografía adecuada cómo funcionan estos elementos técnicos y explica su funcionamiento a raíz de lo que ya sabemos sobre cargas eléctricas.

Comentario: Se puede usar en ambos niveles y optar por presentar al alumno el diagrama o un esquema de una fotocopiadora y pedirle una explicación de su funcionamiento de acuerdo con la teoría desarrollada sobre la interacción eléctrica. Otra posibilidad es la propuesta

Tabla I
Imagen del campo.

Ítem	Nivel I		Nivel II	
	Control N = 135	Exp. N = 48	Control N = 145	Exp. N = 116
1. ¿Cómo crees que es posible que actúen fuerzas entre dos cuerpos sin que haya contacto e incluso estén separados por el vacío (por ejemplo, el Sol y la Tierra, dos imanes, dos cargas, dos corrientes...)? Explícalo brevemente.	22,9	68,8	31,0	56,0
2. ¿Qué es un campo (gravitatorio, eléctrico, magnético)?	11,0	75,0	42,0	72,4
7. Se dice que el campo evita la idea de acción a distancia. ¿Por qué?	3,7	18,8	8,0	47,4

por Amante (1991), consistente en colocar sobre una lámina de cinc otra de azufre, que al frotarse en la oscuridad queda cargada. Se ilumina ahora aquello que queremos reproducir y se proyecta sobre el azufre de la lámina. Sobre éste se deposita, entonces, una capa de polvo negro, se coloca ahora sobre él un papel con cera y se calienta. El polvo negro se traslada al papel encerado quedando fijado y reproduciendo las imágenes.

EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA. MÉTODO, MUESTRAS Y RESULTADOS

Para evaluar la idoneidad de nuestra propuesta de enseñanza-aprendizaje, se han aplicado los materiales elaborados por:

– Los autores de este estudio, que los han utilizado con sus propios alumnos, conformando sendas muestras de 51 alumnos de COU y 48 alumnos de 2º de BUP.

– Otros profesores pertenecientes a diferentes localidades, que los han usado con sus respectivos grupos, abarcando un total de 65 alumnos de COU.

Con ello se pretende reducir, dentro de lo posible, la influencia de factores de carácter ocasional, tales como diferencias en la procedencia social del alumnado, capacidades debidas a su instrucción anterior, personalidad e interés del profesor, etc. Aunque alguno de los profesores obtuvo peores resultados en algún ítem en particular, globalmente no hubo diferencias significativas que aconsejaran un tratamiento estadístico diferenciado entre ambas muestras.

En la clase, los alumnos han trabajado organizados en pequeños grupos. Resuelven en primer lugar las actividades de una forma individual; a continuación, discuten las aportaciones de los restantes miembros del grupo; por último, se hace una puesta en común en la que se incorporan las reflexiones del resto de los grupos. Otras veces se ha trabajado individualmente y en ocasiones la resolución de la actividad ha sido planteada como trabajo en gran grupo.

Con el objetivo de confirmar que los alumnos han alcanzado una comprensión más correcta y duradera de lo que es el campo, de su necesidad y sus implicaciones, se ha pedido a las dos muestras que, después de utilizar los materiales didácticos diseñados (grupos experimentales), respondan al mismo cuestionario empleado inicialmente para demostrar la falta de aprendizaje significativo de los alumnos que siguieron el tratamiento habitual (grupos de control), comparándose a continuación las respuestas obtenidas. De dicha comparación puede deducirse que:

1) Los alumnos del grupo experimental adquieren una imagen del campo más cercana a la concepción científica de éste y asumen que la interacción entre partículas separadas se produce a través de los campos.

Ya hemos señalado que tanto los alumnos del nivel elemental como del superior presentaban dificultades para comprender el concepto de *campo*. Éste aparecía para ellos vacío de significado, reduciéndose, en muchos casos, a un volumen que rodea a la partícula, sin intervenir en la interacción. En general, los alumnos no asumían que la interacción entre partículas separadas se efectuase mediante campos y seguían razonando en términos de fuerzas entre las propias partículas y por tanto «a distancia».

Ahora, sin embargo, al comparar las respuestas dadas a algunos de los ítems del cuestionario utilizado (Tabla I), encontramos una mejora muy significativa en los porcentajes de respuestas correctas que obtienen los alumnos de los grupos experimentales, los niveles elemental (I) y superior (II).

Los alumnos de los grupos experimentales contestan ahora al ítem 1, en el cual les preguntamos cómo tendrá lugar la interacción entre cuerpos separados por grandes distancias, que «los cuerpos interactúan con los campos de los otros cuerpos», lo que nosotros interpretamos como un reconocimiento de que es el campo, y no la partícula que lo crea, el que ejerce la fuerza sobre otra partícula que penetra en él. El porcentaje de respuestas correctas se ha duplicado en ambos niveles, lo que consideramos muy positivo. De la misma forma, un 47% de los alumnos (nivel II) considera ahora la interacción como local (ítem 7) y no a distancia.

De la misma manera y en concordancia con el ítem anterior, la respuesta que se da ahora al ítem 2 («el campo es la región del espacio donde las cargas, masas [...] se ven sometidas a una fuerza») muestra un incremento en el porcentaje de respuestas correctas, sube al 75%. El campo ya no se ve como una región del espacio simplemente, sino que parece intervenir en la aparición de la fuerza, tal como indican las siguientes respuestas:

- a) la interacción se produce con el campo en el que está;
- b) los cuerpos interactúan con los campos de los otros cuerpos.

2) Los alumnos del grupo experimental conocen las diferencias entre la interpretación newtoniana de la interacción mediante fuerzas y la interpretación de ésta mediante campos, y se percatan de la necesidad de introducir dicho concepto.

La mayor parte de los alumnos consideraba que el campo no existía hasta que no había dos partículas presentes, en cuyo caso aparecía la fuerza, y, cuando se les pedía que dibujasen el vector intensidad de campo (ítem 5) en el caso de que sólo hubiese una partícula, contestaban que no había campo, o no dibujaban *E* (lo mismo para *B*). E incluso, cuando había dos partículas, llegaban a dibujar el vector fuerza en lugar del vector intensidad de campo en la mayoría de las ocasiones. Tampoco reconocían que mediante el campo, la interacción deja de ser «a distancia» para convertirse en local.

Tabla II
Necesidad de introducir el concepto de *campo*.

Ítem	Nivel I		Nivel II	
	Control N = 135	Exp. N = 48	Control N = 145	Exp. N = 116
3. ¿Cuántas partículas (masas, cargas) hacen falta para crear un campo (gravitatorio, eléctrico, magnético)?	18,5	70,8	49,0	84,5
5. Dibuja el vector intensidad de campo creado por una carga $Q = +2\text{ C}$ en el punto A en los tres casos siguientes: a) En A hay una carga $q = +1\text{ C}$. b) En A hay una carga $q = -1\text{ C}$. c) En A no hay nada. a) Q . A . b) Q . A . c) Q . A .	5,1	20,8	8,8	34,0
12. Tenemos dos cargas separadas una distancia r . De pronto una de ellas comienza a vibrar. ¿Lo notará la otra carga? ¿Lo hará instantáneamente o tardará algo de tiempo? Justifícalo.	—	—	45,0	78,4

De nuevo vemos en la tabla II un incremento significativo en el porcentaje de respuestas correctas en los grupos experimentales. Así en el ítem 5, el número de alumnos que consideran la existencia del campo y dibujan el vector intensidad de campo, independientemente de que en dicho punto haya carga o no, se cuadruplica porcentualmente en ambos niveles. Por tanto, los alumnos del grupo experimental diferencian mejor entre fuerza y campo, conocen cuándo podemos hablar de la existencia de un campo y cuándo aparece una fuerza (ítem 3 y 5); saben que el campo evita la necesidad de

suponer las interacciones a distancia e instantáneas, convirtiéndolas en locales y proporcionando una velocidad de propagación finita a las perturbaciones que el campo pueda sufrir por alteraciones en las fuentes (ítem 12).

3) Los alumnos conocen las ventajas de introducir la noción de campo. Saben que éste dota de fundamento a la óptica al explicar la naturaleza de las ondas electromagnéticas y además permite el desarrollo posterior de la física y la tecnología.

Tabla III
Ventajas de introducir el concepto de *campo*.

Ítem	Nivel I		Nivel II	
	Control N = 135	Exp. N = 48	Control N = 145	Exp. N = 116
10. ¿Cómo crees que es posible que la señal de televisión que se emite desde Madrid llegue a tu televisor o que lo que habla un locutor de una emisora de radio llegue a tu receptor?	2,2	68,8	32,0	66,4
14. ¿Crees que la teoría electromagnética (o en general la teoría de campos) ha introducido cambios de índole práctica en el mundo en que vives? Señala TRES o más consecuencias prácticas y explica cuál es su fundamento o relación con la teoría electromagnética.	—	—	11,0	35,3
15. ¿Crees que explicar las interacciones entre partículas mediante campos es mejor que mediante la idea de fuerza a distancia? ¿Qué ventajas introduce?	—	—	9,0	11,8

Tabla IV
Energía y campo.

Ítem	Nivel I		Nivel II	
	Control N = 135	Exp. N = 48	Control N = 145	Exp. N = 116
9. Cuando una partícula se encuentra en el interior de un campo, se habla de la existencia de una energía potencial. ¿A qué es debida? ¿Dónde se localiza esta energía?	6,0	47,9	6,0	31,4

Estos aspectos, se han estudiado atendiendo a los ítems 10, 14 y 15 del cuestionario de alumnos. Vimos que los alumnos de los grupos control no llegaban a establecer relaciones entre la teoría electromagnética y sus aplicaciones tecnológicas, desconociendo, incluso, cuáles eran éstas. Mucho menos reconocían el papel desempeñado por la teoría de campos en el desarrollo posterior de la física.

Después de desarrollar el programa de actividades en el aula, los resultados obtenidos se muestran en la tabla III.

Obtenemos de nuevo, tanto en el nivel superior como en el elemental, un incremento significativo en el porcentaje de respuestas correctas. Podemos afirmar, pues, que el alumno conoce el mayor potencial explicativo de la teoría y su contribución al desarrollo de la ciencia y la tecnología y que relaciona, además, las ondas electromagnéticas con las señales de radio y televisión, además de ser capaz de indicar tres o más consecuencias prácticas de la teoría.

El resultado obtenido con el ítem 15 nos permite afirmar que el hecho de que fenómenos como la inducción y autoinducción de corrientes, predicción de ondas electromagnéticas, integración de dominios como la óptica y el electromagnetismo, etc. encuentren un marco explicativo común es apreciado por la comunidad científica e intelectual como una ventaja de una teoría frente a otra, pero no ocurre lo mismo con el alumno. Ello resulta lógico, si tenemos en cuenta que la ciencia enseñada en el aula presenta, fundamentalmente, los contenidos como conclusiones y no como soluciones a problemas. Las teorías no se presentan como construcciones que han de ser comprobadas, refutadas o falsadas, y no se muestra la existencia de rupturas y la aparición de nuevos paradigmas. No se plantean, entonces, las diferencias entre las teorías y los criterios que llevan a la aceptación de una frente a otra, ni se responde a cuestiones tales como: ¿por qué se prefiere una teoría a otra?, ¿por qué se produce un cambio en las ideas aceptadas?, etc.

El alumno no está lo suficientemente entrenado en estas facetas y no es capaz de valorar las características señaladas (mayor poder explicativo, integración de diferentes dominios de la física, etc.) como ventajas de la teoría de campos frente a la «acción a distancia» newtoniana.

4) *En la interpretación de los aspectos energéticos asociados a la interacción, se tiene en cuenta el papel que desempeña el campo.*

Los resultados obtenidos sobre esta cuestión nos permitían afirmar que el alumno no llegaba a asociar la energía con el campo, sino que ésta permanecía asociada a las partículas, que actuaban como soporte de ella. Así, por ejemplo, en situaciones típicas como son las de caída libre en el seno de un campo gravitatorio, dicho campo juega un papel pasivo, en todo caso provoca la fuerza que obliga al cuerpo a caer, pero no interviene en los intercambios energéticos. La energía cinética del cuerpo se transforma en energía potencial «del cuerpo» y viceversa.

Los alumnos de ambos niveles, al recibir una enseñanza que intenta clarificar el papel del campo en las transferencias de energía en situaciones habituales, de forma que no se consideren las partículas como «soporte» de la energía, muestran un incremento bastante significativo (cinco veces superior como mínimo) en el porcentaje de respuestas correctas a la pregunta formulada en el ítem.

Podemos concluir, pues, que en la aplicación de materiales didácticos (programa de actividades) se plantea proporcionar una visión clara del concepto de *campo*, diferenciándolo del de *fuerza*, mostrando las ventajas de la nueva interpretación de interacción, al explicar fenómenos nuevos y permitir el avance de la física, al relacionarlo con sus aplicaciones tecnológicas, etc. Esta introducción unida a una metodología que potencia el cambio conceptual y fomenta aspectos propios del método científico, produce un considerable aumento de la comprensión que los alumnos alcanzan de la teoría electromagnética y del campo gravitatorio, además de disminuir las ideas erróneas que inicialmente poseían.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Las dificultades detectadas en el aprendizaje y comprensión del concepto de *campo*, ya sea gravitatorio, eléctrico o magnético, se han interpretado en este trabajo como consecuencia de un tratamiento didáctico deficiente y confuso. En general, los alumnos que han recibido una enseñanza en la que el profesor se conforma con realizar

definiciones operativas y manipulaciones cuantitativas (problemas de cálculo) de los conceptos, sin profundizar en su significado, sin relacionarlos ni diferenciarlos entre sí, etc., presentan una serie de dificultades y confusiones, de forma que:

- Adquieren una imagen del campo lejos de la concepción científica. Lo confunden con una región o volumen del espacio que delimita la influencia de una carga, masa o imán.

- Siguen pensando en términos de fuerza y no modifican sus ideas previas sobre la interacción entre partículas. El campo no se considera como el agente de la interacción y generalmente se confunde con la fuerza.

- No llegan a conocer las diferencias entre la teoría newtoniana sobre las interacciones entre partículas y la teoría de campos. También desconocen las ventajas que esta última introduce, su mayor potencialidad y su contribución al desarrollo de la física.

- No tienen en cuenta el papel desempeñado por el campo en la interpretación de los aspectos energéticos asociados a la interacción entre partículas.

- No llegan a relacionar la teoría de campos con sus múltiples aplicaciones tecnológicas, ni conocen las repercusiones que ha tenido para la ciencia y la sociedad.

Sin embargo, las aportaciones de la investigación didáctica en diversos campos acerca de la enseñanza de las ciencias nos permiten diseñar nuevos materiales que, aplicados en el aula, mejoran el aprendizaje del alumno. Dichos programas de actividades incorporan los resultados obtenidos por nosotros en esta investigación sobre la interacción gravitatoria y electromagnética, así como otros obtenidos en los últimos años por diferentes investigadores.

La utilización en el aula de estos programas produce una mejora en el aprendizaje de los conceptos relativos a la teoría de campos y de aquellos otros aspectos que hemos reseñado anteriormente como deficiencias a superar, lo que hemos podido comprobar al aplicar el programa de actividades a sendos grupos de alumnos y comparar las respuestas proporcionadas, a un mismo cuestionario, por estos grupos (experimentales) con otros de los mismos niveles educativos (grupos control).

Otro aspecto de especial interés, en el que cabe profundizar, es la cuestión del elevado peso de la mecánica newtoniana en los programas de física de todos los niveles de enseñanza. Aunque es evidente que esta teoría

permite al alumno una comprensión bastante buena de su realidad circundante y, por tanto, es necesario su estudio e incluso podríamos decir que imprescindible, debemos preguntarnos si no estará condicionando de una forma negativa la comprensión de otras parcelas de la física y, por tanto, de una parte de la realidad menos tangible pero tan importante como aquélla. El hecho de que futuros profesores contesten incorrectamente cuando se les pide que dibujen el vector intensidad de campo en puntos donde no hay cargas (ítem 5), confundiendo el vector intensidad de campo E con la fuerza F , nos muestra la persistencia de las ideas newtonianas. De igual modo, la forma en que se interpreta el principio de conservación de la energía en los procesos de caída libre, donde el papel del campo se «olvida» y la energía cinética de la partícula se convierte en energía potencial «de la partícula», muestra también dicha persistencia. En resumen, profundizar en el excesivo peso de la mecánica newtoniana en los programas y en cómo introducir los aspectos energéticos cuando hay campos presentes son vías de investigación que creemos de la máxima importancia.

Además, las dificultades encontradas, cuando se pide al alumno que responda acerca de las ventajas de la teoría de campos frente a la newtoniana de acciones a distancia, muestran que el profesorado no realiza un tratamiento clarificador sobre aspectos relacionados con la evolución de las teorías, sobre por qué una explicación se prefiere a otra, cómo se abandona una teoría, qué hace falta para que la comunidad científica esté insatisfecha con ésta, etc. Eso hace que la ciencia, y en particular la física, se presente como una sucesión de modelos o teorías que se van encadenando en el tiempo hasta que surge un nuevo «genio» que pueda transformarla. La realización de propuestas didácticas que fomenten no sólo aspectos de la metodología científica, como la emisión y comprobación de hipótesis, el diseño de experimentos, el análisis de resultados, etc., sino estas otras cuestiones de historia de la ciencia nos parece necesaria en la formación del profesorado.

Por último, las valoraciones que el profesorado realiza de la metodología propuesta abren una perspectiva esperanzadora en la implantación de una estrategia de enseñanza basada en el aprendizaje por investigación, de forma que creemos importante que las actividades de formación continua dirigidas al profesorado incorporen propuestas en este sentido. Sin embargo, no hemos de olvidar que la transformación de los procesos de enseñanza y aprendizaje es compleja, requiere tiempo y reformas estructurales que permitan la constitución de grupos de investigación e innovación que eviten el aislamiento del profesorado en sus centros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMANTE, J. (1991). *La base de la física*. Libros Penthalon, pp. 154-156.
- BAGNO, E. y EYLON, B.S. (1997). From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism. *American Journal of Physics*, 65(8), pp. 726-736.
- BAR, V., ZINN, B. y RUBIN, E. (1997). Children's ideas about actions at a distance. *International Journal of Science Education*, 19(10), pp. 1137-1158.
- BERKSON, W. (1985). *Las teorías de los campos de fuerza. De Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza Editorial.
- CANTOR, G., GOODIN, D. y JAMES, F.A.J.L. (1994). *Faraday*. Madrid: Alianza Editorial.
- CUDMANI, L. y FONTDEVILA, P. (1989). Física básica: A organização de conteúdos no ensino-aprendizagem do electromagnetismo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 6, pp. 196-210.
- DOMÍNGUEZ, M.E. y MOREIRA, M.A. (1988). Significados atribuidos aos conceitos de campo elétrico e potencial elétrico por estudantes de física general. *Revista de Ensino de Física*, 10, pp. 67-81.
- FEYNMAN, R. (1972). *The Feynman Lectures on Physics. Vol. II Electromagnetismo y materia*. Fondo Educativo Interamericano, SA.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (1993). ¿Puede ayudar la historia de la ciencia a entender por qué los estudiantes no comprenden los conceptos de carga y potencial eléctricos? *Revista Española de Física*, 7(3), pp. 46-50.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (1998). Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(1), pp. 131-146.
- GALILI, I. (1993). Weight and gravity: teachers' ambiguity and students' confusion about the concepts. *International Journal of Science Education*, 15(2), pp. 149-162.
- GALILI, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 3, pp. 371-387.
- GARCÍA DONCEL, M. (1994). Heinrich Hertz. *Investigación y Ciencia*, 208, pp. 72-79.
- GIL, D. (1983). Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 1(1), pp. 26-33.
- GIL, D. et al. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona: ICE - Horsori.
- GIL, D. et al. (1999). ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2), pp. 311-320.
- GRECA, I.M. y MOREIRA, M.A. (1997). The kinds of mental representations -models, propositions and images, used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*, 19(6), pp. 711-724.
- MENESES, J.A. y CABALLERO, M.C. (1995). Secuencia de enseñanza sobre el electromagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias*, 13(1), pp. 36-45.
- MARTÍN QUERO, J. (1999). «La introducción del concepto de campo en física.» Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- MARTÍN QUERO, J. y SOLBES, J. (1999). La enseñanza del concepto de campo en secundaria y bachillerato. *Actas de la XXVII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física*. Valencia.
- NARDI, R. y CARVALHO, A.M.P. (1990). A Gênese, a psicogênese e a aprendizagem do conceito de campo: subsídios para a construção do ensino desse conceito. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 7, pp. 47-69.
- NARDI, R. (1994). História da ciência x aprendizagem: algumas semelhanças detectadas a partir de um estudo psicogenético sobre as idéias que evoluem para a noção de campo de força. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(1), pp. 101-106.
- POMER, F. (1994). *Electromagnetisme bàsic*. Valencia: Universidad de Valencia.
- POON, C.H. (1986). Teaching field concept and potential energy at A-level. *Physics Education*, 21, pp. 307-316.
- SHARMA, N.L. (1987). Field versus action at a distance in a static situation. *American Journal of Physics*, 56, pp. 420-423.
- SNEIDER, C.I. y OHADI, M. (1998). Unraveling Students' Misconceptions about the Earth's Shape and Gravity. *Science Education*, 82(2), pp. 265-284.
- SOLBES, J. y MARTÍN QUERO, J. (1991). Análisis de la introducción del concepto de campo. *Revista Española de Física*, 5(3), pp. 34-40.
- SOLBES, J. y TARÍN, F. (1996). *Física. 2º de bachillerato*. Barcelona: Ediciones Octaedro, SL.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp. 103-112.
- STRUBE, P. (1988). The presentation of energy and fields in physics texts a case of literary inertia. *Physics Education*, 3, pp. 366-371.
- TIPLER, P. (1992). *Física*. Barcelona: Reverté.
- VIENNOT, L. y RAINSON, S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, 14(4), pp. 475-487.
- VIENNOT, L. y RAINSON, S. (1999). Design and evaluation of a research-based teaching sequence: the superposition of electric field. *International Journal of Science Education*, 21(1), pp. 1-16.
- WATTS, M. (1982). Gravity don't take for granted! *Physics Education*, 17, pp. 116-121.

[Artículo recibido en junio de 2000 y aceptado en noviembre de 2000.]